

ОЦЕНКА ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ИСПЫТАНИИ ОБРАЗЦОВ ГЛИНЫ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ К СУШКЕ

ИВАНОВСКИЙ И. К., докт. техн. наук, проф. ОСИПОВ С. Н.

Белорусский национальный технический университет

Необходимость повышения качества и одновременного снижения себестоимости керамических изделий требует использования надежных и эффективных методов оценки сушильных свойств глин и формовочных композиций на основе лабораторных испытаний образцов. В настоящее время совместно или порознь применяются методы З. А. Носовой [1] и А. Ф. Чижского [2].

Метод оценки чувствительности глин к сушке, предложенный З. А. Носовой, является косвенным, так как образцы формовочной массы сушатся в естественных условиях лаборатории при температуре воздуха около 20 °С и относительной влажности около 60 %, что явно не соответствует термодинамическим условиям сушки в туннельных сушилах.

Метод оценки чувствительности глин к сушке, предложенный А. Ф. Чижским, основан на интенсивном нагреве образцов формовочных масс мощным лучистым потоком, что обеспечивает более жесткий режим сушки по сравнению с производством. При этом чувствительность формовочной массы к сушке оценивается по величине промежутка времени от установки образцов под мощный лучистый поток ($S \approx 1,0 \text{ Вт/см}^2$) до появления первой трещины или заметной деформации образца. Поэтому данный метод можно считать прямым определением чувствительности к сушке.

Отметим, что до сих пор ни один из методов определения чувствительности глин к сушке не был стандартизирован, а применялся на основании рекомендаций разработчиков (НИИСтройкерамика, г. Москва и НИИСтройматериалов, г. Киев). Кроме того, обе методики в процессе производственного применения подвергались существенной корректировке, особенно в части показателей деления глин на малой, средней и высокой чувствительности к сушке, которые были определены сугубо эмпирическим путем без серьезного научного обоснования.

По первоначальной шкале А. Ф. Чижского [2] чувствительности глин к сушке оценивалась следующим образом:

- высокочувствительные – при $K_q = 30...50 \text{ с}$;
- среднечувствительные – при $K_q = 60...80 \text{ с}$;
- малочувствительные – при $K_q = 90...130 \text{ с}$ и более.

После корректировки [3] значения показателей чувствительности составляют:

- высокочувствительные – при $K_q \leq 100 \text{ с}$;
- среднечувствительные – при $K_q = 100...180 \text{ с}$;
- малочувствительные – при $K_q \geq 180 \text{ с}$.

Как видно, в результате корректировки значения показателей чувствительности различных групп глин стали жестче. Поэтому необходимо оце-

нить теплообменные процессы, протекающие в образцах керамических масс в начале интенсивной радиационной сушки, особенно в первые 300 с, когда по методике А. Ф. Чижского образуются первые трещины.

В период интенсивного нагрева поверхности образца, имеющего форму пластинки, в глиняной массе начинается значительный термоградиентный перенос влаги [4], благодаря которому обезвоживаются поверхностные слои и образуется существенный перепад влагосодержания между поверхностью и тыльной изолированной частью образца. Последнее приводит к интенсивной усадке поверхностных слоев и образованию трещин или иных явных признаков недопустимой деформации.

В опытах, проведенных А. В. Лыковым, с шаром диаметром 6,5 см из бескудниковской глины, который нагревался с разными скоростями в атмосфере при 100 % относительной влажности, что исключало испарение влаги с поверхности шара, трещинообразование происходило при поверхностных градиентах температур, соответствующих градиентам поверхностной влажности, равным или более 1,3 %/см, что объясняется явлением термоградиентного переноса влаги.

При градиенте поверхностной влажности 0,9 %/см, несмотря на высокую температуру (90 °С) и продолжительное время нагрева, трещин не наблюдалось.

Предельные градиенты поверхностной влажности, выше которых возникали трещины в аналогичных условиях экспериментов, для кучинской глины составили 1,22...1,25 %/см и для нижнекотловской – 1,7...1,8 %/см.

При высокой интенсивности облучения даже в первые 300 с вместе с нагреванием начинается испарение влаги с поверхности образца, что приводит к некоторому уменьшению воздействия теплового потока.

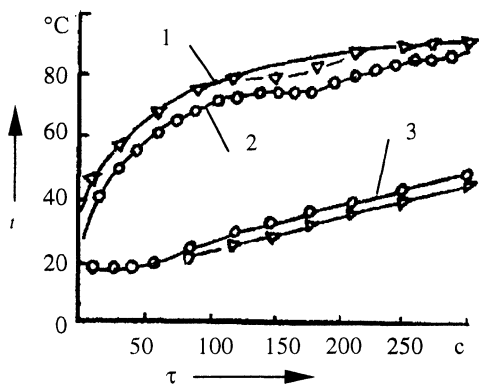


Рис. 1. Изменение температур на нагреваемых (1, 2) и тыльных (3) поверхностях образцов глин при интенсивности теплового потока $S = 0,7 \text{ Вт/см}^2$: 1 – лукомльская глина при $h = 2 \text{ см}$; 2 – спондилловая глина при $h = 1,6 \text{ см}$

Как показывают наши эксперименты с лукомльской и А. Ф. Чижского со спондилловой глиной [2], результаты которых приведены на рис. 1, температуры поверхностей образцов толщиной 2,0 и 1,6 см изменяются примерно одинаково по зависимости, близкой к обратной экспоненте. Как видно по изменению температуры нагреваемой поверхности образца (рис. 1, кривая 1), через 120...130 с после начала облучения рост температуры до 170...180 с почти прекращается, что связано с достижением интенсивности испарения энергетического пре-

дела потока энергии облучения и перемещением зоны испарения вглубь образца. В дальнейшем это вызывает продолжение роста температуры обезвоженной поверхности после 180 с облучения.

Такое отклонение температурной кривой незначительно влияет на процесс прогревания образца глины и при аппроксимации результатов замеров может не учитываться.

Если разность между конечной и начальной температурами нагрева поверхности образцов Δt_0 принять за единицу, то относительное изменение температур имеет экспоненциальную форму вида (рис. 2)

$$\frac{\Delta t}{\Delta t_0} = \exp(-\beta\tau), \quad (1)$$

а после логарифмирования для определения коэффициента показателя экспоненты $\beta [1/^\circ\text{C}]$

$$\ln\left(\frac{\Delta t}{\Delta t_0}\right) = -\beta\tau, \quad (2)$$

где Δt_0 – условная максимальная разность температур поверхности образца в начале и конце экспериментальной сушки, $^\circ\text{C}$; Δt – текущая разность температур поверхности образца, $^\circ\text{C}$; τ – время экспериментальной сушки, с.

Расчеты и графические построения (рис. 3) показывают, что более удачная аппроксимация данных, приведенных на рис. 2, имеет место при условной максимальной температуре окончания экспериментальной сушки 90°C и значение коэффициента составляет $\beta = 0,0135 \text{ 1/}^\circ\text{C}$. При этом точка, соответствующая $\tau = 30 \text{ с}$, явно отвечает $\beta = 0,022 \text{ 1/}^\circ\text{C}$, что свидетельствует о более интенсивном нагревании поверхности образцов при отсутствии испарения влаги.

Полученная зависимость (2) позволяет использовать решение уравнения Фурье

$$a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = \frac{\partial t}{\partial \tau}, \quad (3)$$

с начальными и граничными условиями:

$$t(x, 0) = t_0; \quad t(0, \tau) = t_0 + (t_k - t_0)[1 - \exp(-\beta\tau)]; \quad \partial t / \partial x(h, \tau) = 0 \quad (4)$$

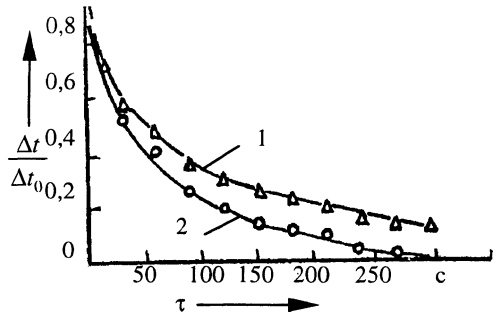


Рис. 2. Относительное изменение разности температур нагреваемой поверхности образца во времени от начала сушки при $t_k = 90 \dots 100^\circ\text{C}$: 1 – конечная температура $t_k = 100^\circ\text{C}$; 2 – 90°C

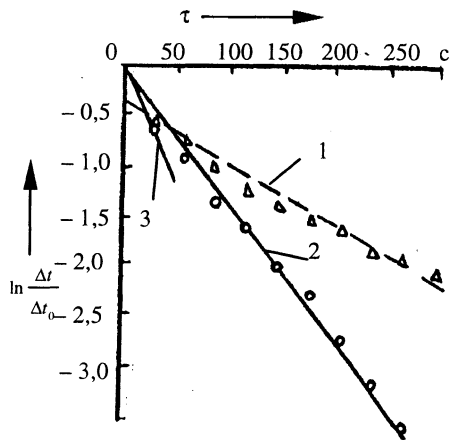


Рис. 3. Относительное изменение разности температур нагреваемой поверхности образца во времени от начала сушки при $S = 0,7 \text{ Вт/см}^2$ в полулогарифмической системе координат: 1 – при $t_k = 100^\circ\text{C}$; 2 – 90°C ; 3 – для точки при $\tau = 30 \text{ с}$

в виде [5]

$$t = t_0 + \theta(t_k - t_0), \quad (5)$$

где

$$\theta = 1 - \frac{\cos[\sqrt{Pd}(1-\eta)]}{\cos\sqrt{Pd}} \exp(-PdFo) - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{Pd}{Pd - \mu_n^2} \cos[\mu_n(1-\eta)] \exp(-\mu_n^2 Fo); \quad (6)$$

$$\mu_n = (2n-1)\pi/2; \quad A_n = (-1)^{n+1} \cdot 2/\mu_n; \quad (7)$$

и

$$\frac{\partial t}{\partial x} = G \frac{t - t_0}{h}. \quad (8)$$

Здесь

$$G = \sqrt{Pd} - \frac{\sin[\sqrt{Pd}(1-\eta)]}{\cos\sqrt{Pd}} \exp(-PdFo) + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \frac{Pd}{Pd - \mu_n^2} \sin[\mu_n(1-\eta)] \exp(-\mu_n^2 Fo); \quad (9)$$

$$C_n = (-1)^{n+2} 2; \quad Fo \equiv \frac{\alpha t}{h^2}; \quad Pd \equiv \frac{\beta h^2}{a}; \quad \eta \equiv \frac{x}{h}, \quad (10)$$

α – коэффициент температуропроводности, $\text{см}^2/\text{с}$; t – текущая температура, $^{\circ}\text{C}$; x – расстояние от поверхности нагрева, см ; h – толщина пластинки, см .

Поток влаги через единицу площади сечения в капиллярно-пористых телах, к которым относятся глинистые формовочные смеси, с учетом термоградиентного влагопереноса описывается уравнением

$$i = a_m \rho_0 \frac{du}{dx} - a_m \rho_0 \delta \frac{dt}{dx}, \quad (11)$$

где a_m – коэффициент влагопроводности (диффузии) материала, $\text{см}^2/\text{с}$; ρ_0 – плотность сухого материала, $\text{г}/\text{см}^3$; u – влагосодержание, $\text{г}/\text{г}$; δ – коэффициент термоградиентного переноса, $1/^{\circ}\text{C}$ ($\%/^{\circ}\text{C}$).

Из (11)

$$i = a_m \rho_0 \left(\frac{du}{dx} - \delta \frac{dt}{dx} \right). \quad (12)$$

Откуда видно, что изменение направления потока влаги в глиняном образце при экспериментальной сушке происходит при

$$\frac{du}{dx} = \delta \frac{dt}{dx} \quad (13)$$

и зависит от градиентов влажности и температуры, а также величины коэффициента термоградиентного переноса.

Как показывают исследования [4, 6, 7], величина δ зависит от влажности глины и правая ветвь этой зависимости в интервале рабочей влажности керамических масс пластического формования ($\geq 15\%$) может быть описана уравнениями прямой

$$\delta = \delta_{my} - \psi u, \quad (14)$$

где δ_{my} – максимальное условное значение δ , полученное при продлении правой части до оси δ , $\%/^{\circ}\text{C}$; ψ – эмпирический коэффициент, $1/^{\circ}\text{C}$.

Для лукомльской глины с 20% гранитного отсева, используемой для производства полнотелого кирпича на Минском заводе строительных материалов, $\delta_{my} = 0,214 \%/^{\circ}\text{C}$ и $\psi = 0,0063 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$.

Для численного определения температур и градиентов температур в испытуемом образце глины можно воспользоваться номограммами [5], в соответствии с одной из которых при $\eta = 0$ на рис. 4 приведена зависимость $G = f(\tau)$. При этом принято табличное [5] значение $a = 0,556 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$ и $h = 2 \text{ см}$. Здесь также нанесена точка (2), соответствующая $\beta = 0,022 \text{ с}^{-1}$.

Как видно из этой кривой, максимальная величина градиента температуры наступает примерно через 90 с после начала сушки и соответствует величине $dt/dx = 56 \text{ } ^{\circ}\text{C}/\text{см}$ (рис. 5, 7), что является весьма высоким показателем. Уже через 30 с после начала сушки градиент температуры на поверхности образца глины достигает $52 \text{ } ^{\circ}\text{C}/\text{см}$. Только в конце испытаний $\tau = 300 \text{ с}$ градиент температуры снизился до $37 \text{ } ^{\circ}\text{C}/\text{см}$.

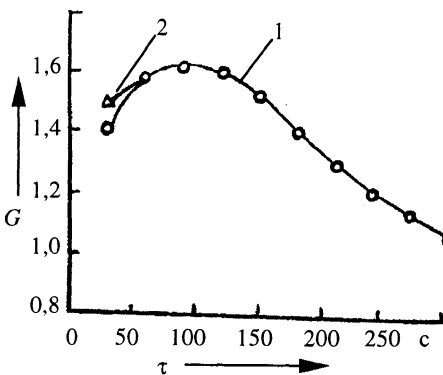


Рис. 4. Изменение параметра градиента температуры на облучаемой поверхности образца при $h = 2 \text{ см}$ и $S = 0,7 \text{ Вт}/\text{см}^2$ во времени от начала сушки: 1 – при $\beta = 0,0135 \text{ с}^{-1}$; 2 – $0,022 \text{ с}^{-1}$

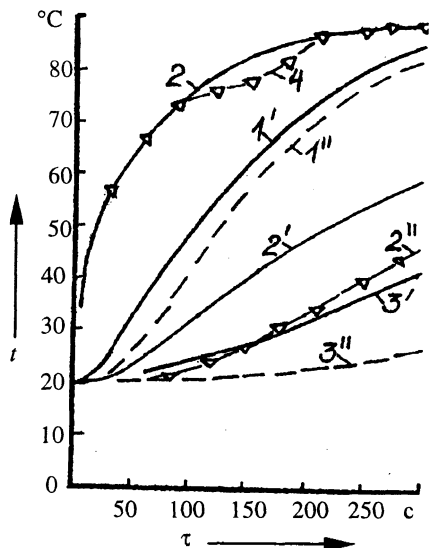


Рис. 5. Ход температур при нагреве образцов с интенсивностью $S = 0,7 \text{ Вт}/\text{см}^2$ и соответственно $\eta = 0,5$ и $1,0$: 1' и 1'' – при $h = 1 \text{ см}$; 2, 2' и 2'' – 2 см ; 3' и 3'' – 3 см ; 4 – интенсивное испарение влаги с поверхности

Числа гомохронности полей потенциалов переноса, называемые числами Фурье:

$$Fo_t = \frac{a\tau}{R^2} \quad \text{и} \quad Fo_m = \frac{a_m\tau}{R^2}, \quad (15)$$

где R – характерный размер, который определяет режим релаксации теплового и концентрационного напряжения массы [4].

Для оценки запаздывания компенсации термоградиентного потока влаги концентрационным используется критерий Lu , который в случае испарения влаги с поверхности капиллярно-пористого тела (глины) составляет

$$Lu = \frac{a_m}{a}, \quad (16)$$

где a_m – коэффициент массопроводности, $\text{см}^2/\text{с}$.

Изменение критерия Lu в зависимости от влагосодержания глины можно аппроксимировать простой линейной зависимостью [4]

$$Lu = 0,54u_m, \quad (17)$$

где u_m – влагосодержание глины, $\text{кг}/\text{кг}$.

При современных влагосодержаниях формовочной глиняной массы ($\sim 0,2 \text{ кг}/\text{кг}$) значение критерия Lu составляет примерно 0,1, что указывает на разницу в периодах релаксации полей температур и влагосодержания на один порядок, а при снижении влагосодержания – на два порядка.

Для песка, по данным Н. Н. Бабьева, при $u_m \geq 0,15 \text{ кг}/\text{кг}$ $Lu > 1$, а по данным П. Д. Лебедева, – при любом влагосодержании.

Реальная продолжительность влияния термоградиентного переноса влаги на центральную часть кирпича-сырца из ленинградский глины при конвективной сушке теплоносителем с соответствующей температурой сухого $t_c = 46 \text{ }^\circ\text{C}$ и мокрого $t_m = 41,6 \text{ }^\circ\text{C}$ термометра составляет примерно 5400 с (1,5 ч) [8]. При различных режимах сушки ($t_c = 34,2 \dots 56 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_m = 20 \dots 52,5 \text{ }^\circ\text{C}$ и $v = 0,5 \dots 2 \text{ м}/\text{с}$) средний градиент поверхностной влажности составлял от 1,78 до 3,94 $\%/ \text{см}$. С ростом интенсивной сушки поверхностный градиент влажности обычно также увеличивается, что может привести к терцинообразованию.

Для оценки температурных полей в самом начале интенсивной ($S = 0,7 \text{ Вт}/\text{см}^2$ при $\tau \leq 300 \text{ с}$) сушки образцов толщиной $h = 1; 2$ и 3 см из лукомльской глины с гранитным отсеком произведены расчеты по формулам (5)–(7), которые показали (рис. 5) хорошее совпадение расчетных (кривая 2") и фактических (экспериментальные точки ∇) значений температур на обратной стороне образца.

Кроме того установлено, что при толщине глиняного образца $h = 1$ см, которая была официально рекомендована («Указания по определению чувствительности глин и шихт к сушке», Киев, 1974) и до сих пор повсеместно применяется на предприятиях керамической промышленности, уже при $\tau = 100$ с температура на обратной от нагреваемой до $t \approx 85$ °С стороне пластинки достигает 40 °С и более (рис. 6). При $\tau = 180$ с, т. е. на границе начала зоны малой чувствительности глин к сушке, температура на обратной стороне образца достигает 65 °С, что обычно бывает на практике в зоне окончания конвективной сушки в туннельной сушилке.

Как показали исследования [9], с ростом температуры глинистой массы ее пластические свойства улучшаются, что неоднозначно влияет на деформационные и усадочные процессы при сушке. Кроме того, многочисленные исследования [2, 4, 9] показали заметный рост коэффициента влагопроницаемости керамических масс с ростом температуры, что при прочих равных условиях снижает склонность глинистых образцов к трещинообразованию, так как допускает повышение перепада влажности между поверхностными и центральными слоями.

При толщине образцов $h = 3$ см температура их тыльной стороны превышает начальный уровень через 100 с менее чем на 1 °С, а через 180 с – всего лишь на 1...2 °С, т. е. остается практически начальной, что ужесточает условия испытаний.

Резкие изменения температуры приурочены к слоям вблизи нагреваемой поверхности, что должно способствовать проявлению трещинообразования.

Исходя из (13), для количественной оценки влияния процессов термодиффузионного переноса влаги особенно важным является величина термодиффузионного коэффициента как вблизи нагреваемой поверхности, так и по всей толщине глиняного образца.

Как видно из результатов расчетов по (8)–(10), которые графически представлены на рис. 7, с ростом толщины образца в 3 раза максимальные значения градиентов температур на нагреваемой поверхности $\eta = 0$ уменьшаются с 66 до 46 °С/см, т. е. в 1,43 раза. В средних слоях образцов ($\eta = 0,5$) для этих же условий уменьшение градиентов температур составило около 1,4 раза.

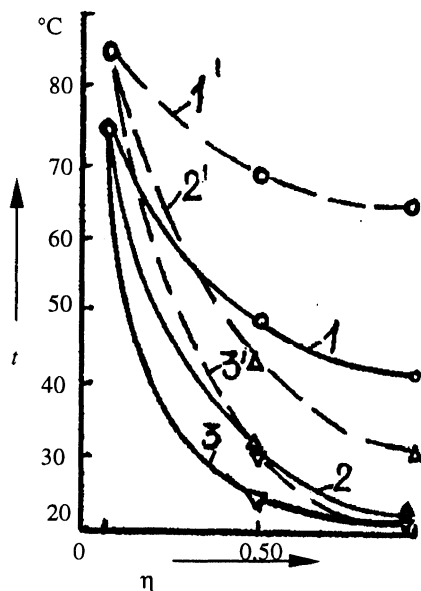


Рис. 6. Изменение температуры по толщине образцов при $S = 0,7$ Вт/см²; $h = 1; 2$ и 3 см; 1; 2 и 3 – при $\tau = 100$ с; 1', 2' и 3' – 180 с

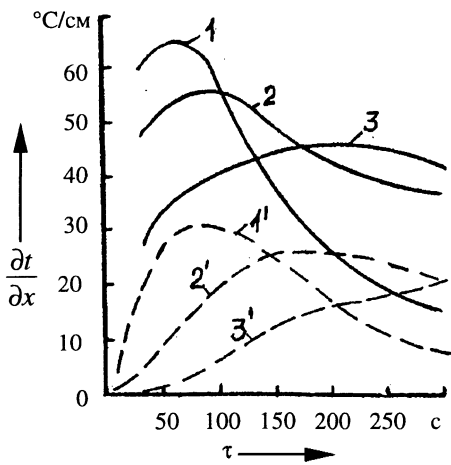


Рис. 7. Изменение градиентов температур в образцах глины при $S = 0,7 \text{ Вт/см}^2$ и соответственно $\eta = 0$ и $0,5$: 1 и 1' — при $h = 1 \text{ см}$; 2 и 2' — 2 см ; 3 и 3' — 3 см

С течением времени после начала сушки градиенты температур сначала интенсивно растут, особенно при $h = 1 \text{ см}$, а затем плавно уменьшаются по мере прогревания образцов. Поэтому термоградиентный перенос влаги должен оказывать основное влияние на трещинообразование в начальном периоде сушки $\tau \leq 300 \text{ с}$. Чем тоньше пластинка глиняного образца, тем кратковременней значительное влияние термоградиентного переноса влаги, приводящего к обезвоживанию поверхностных слоев глины.

Следует ожидать, что для образцов толщиной 2 см из высокочувствительных глин $K_{\text{ч}} \leq 100 \text{ с}$ главной причиной образования поверхностных трещин являются процессы термоградиентного переноса влаги и обезвоживания поверхностных слоев глины, так как в этот промежуток времени удаление влаги за счет испарения еще относительно невелико. Максимальный поверхностный градиент влажности в зависимости от величины коэффициента термоградиентного переноса δ может достигать даже $6 \dots 8 \text{ } ^\circ\text{C/см}$ в зависимости от свойств глины и ее влажности.

Если исходить из теории образования поверхностных трещин, предложенной А. В. Лыковым на основе расчета предельного напряжения деформации сдвига [4], то для оценки условий трещинообразования в числе других параметров необходимо учитывать поверхностный градиент влажности $(\nabla u)_{\text{п}}$, который только за счет термоградиентного переноса составляет $(\nabla u)_{\text{п},\tau} = \delta(dt/dx)_{x \rightarrow 0}$. Критическая величина $(\nabla u)_{\text{п}}$, при которой происходит поверхностное трещинообразование, например черемушкинской глины, при конвективной сушке оценивается величиной $(\nabla u)_{\text{п,кр}} \approx 2,2 \text{ \%}/\text{см}$, что при $(dt/dx)_{\text{п}} = 50 \dots 60 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{см}$ возможно уже при $\delta \geq 0,045 \text{ \%}/^\circ\text{C}$.

Как показывают результаты экспериментов А. В. Лыкова, проведенных в атмосфере, насыщенной водяными парами до 100 \% относительной влажности, с глиняными шарами диаметром $6,5 \text{ см}$ при разных скоростях прогревания, у бескудниковской глины трещины получались при поверхностном градиенте $(dt/dR) \geq 11 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{см}$, что приводило к образованию поверхностного градиента влажности $(du/dR)_{\text{п}} \geq 1,3 \text{ \%}/\text{см}$ (для аналогичного образца в виде пластины толщиной $6,5 \text{ см}$ величина поверхностного градиента влажности $\approx 2,2 \text{ \%}/\text{см}$).

Предельные поверхностные градиенты влажности, выше которых возникают трещины под влиянием термоградиентного перемещения влаги, для шарообразных образцов составили 1,22...1,25 %/см (для пластины – примерно 2,1 %/см), для нижнекотловской глины 1,7...1,8 %/см (для пластины – примерно 1,3 %/см).

Такие величины предельных (критических) градиентов поверхностных влажностей также соответствуют глинам, достаточно чувствительным к трещинообразованию при сушке. Последнее для нижнекотловской глины подтверждается опытами П. Д. Лебедева [6]. Так, любые трещины (поверхностные и внутренние) отсутствовали только при интенсивности лучистого потока в течение периода прогрева образцов в размере менее $S < 0,1$ Вт/см². При больших интенсивностях начального облучения под поверхностной коркой толщиной 3...8 мм образовалось расслоение материала, где появлялся переувлажненный слой.

Если глинистая формовочная масса относится к средней чувствительности по сушке $K_ч = 100...180$ с, то при $h = 1...2$ см влияние термоградиентного переноса к моменту образования трещин заметно снижается, но зато резко возрастает интенсивность обезвоживания за счет испарения влаги с нагреваемой поверхности образца.

При толщине образцов $h = 3$ см поверхностный градиент температуры в этот период времени растет и к $\tau = 200$ с достигает максимума (рис. 7). Одновременно увеличивается интенсивность испарения влаги под действием мощного теплового потока. Поэтому при малой чувствительности глины к сушке в образовании поверхностных трещин заметную роль, по-видимому, играют испарение влаги с поверхности и перераспределение в объеме образцов.

Для оценки изменения величины градиента температуры по толщине образцов в результате расчетов на рис. 8 приведены соответствующие зависимости. Как видно из этих зависимостей, вследствие их небольшой кривизны в качестве среднего значения градиента температуры по толщине образца можно принять среднеарифметическое значение, равное $(dt/dx)_{cp} = (dt/dx)_n/2$.

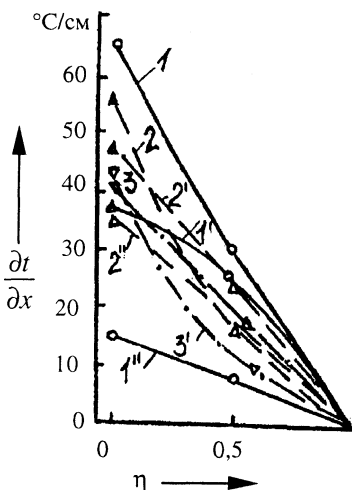


Рис. 8. Изменение градиентов температур по толщине образцов при $S = 0,7$ Вт/см²; $\tau = 60; 150$ и 300 с; 1, 1' и 1'' – при $h = 1$ см; 2, 2' и 2'' – 2 см; 3, 3' и 3'' – 3 см

Среди предложенных примерно 20-ти методик оценки чувствительности керамических формовочных масс к сушке в данном случае особый интерес представляет методика З. А. Смоляковой [10], основанная на определении среднего критического градиента влажности, при котором происходит образование поверхностных трещин в соответствии с теорией А. В. Лыкова [4]. В этом смысле предложенная З. А. Смоляковой [10] классификация глин по величине критического градиента влажности (табл. 1) представляет известный интерес.

Таблица 1

Класс глины	Критический градиент влажности, %/см	Начальные параметры теплоносителя		Продолжительность сушки, ч
		t , °С	ϕ , %	
I	$(\nabla u)_{кр}^* > 3,0$	60...70	55...60	12
II	$2,6 < (\nabla u)_{кр} \leq 3,0$	50	65...70	18...24
III	$1,8 < (\nabla u)_{кр} \leq 2,5$	35...40	80	24...36
IV	$1,2 < (\nabla u)_{кр} \leq 1,8$	32	80...85	48
V	Менее 1,2	Не более 30	82...85	60...72

$$^* (\nabla u)_{кр} = (\Delta u)_{кр}/h.$$

Так, по данным А. Ф. Чижского [2], при интенсивной сушке малочувствительной спондиловой глины и толщине образцов 1,6; 2,0; 3,0 и 6,5 см трещины на поверхности образовывались при градиентах поверхностной влажности соответственно 33,0; 23,3; 10,5 и 4,65...5,8 %/см и при средних градиентах влажности соответственно 5,64; 5,25; 3,0 и 1,43...2,0 %/см. При этом критические перепады влажности между поверхностными и центральными слоями образцов, при которых происходило трещинообразование, составили 9...13 %.

На основании этих и других данных, взятых из графиков, приведенных А. Ф. Чижским [2], в табл. 2 представлены результаты расчетов показателей условий трещинообразования при испытании образцов из спондиловой глины.

Как известно [4, 6], начало первого периода сушки, который иногда называют регулярным, характеризуется наступлением стационарного поля температур $dt/d\tau = 0$ и параболическим распределением влажностей, описываемых выражением

$$u = u_{ц} - \frac{x^2}{h^2} (u_{ц} - u_{п}) = u_{ц} - \frac{x^2}{h^2} \Delta u. \quad (18)$$

Тогда градиент влажности в любой точке поля (начало системы координат находится на средней плоскости пластины толщиной $2h$ при двух-

сторонней симметричной сушке или на тыльной по отношению к нагреваемой поверхности при одностороннем облучении образцов) составляет

$$\frac{du}{dx} = -\frac{2x}{h^2} \Delta u. \quad (19)$$

Таблица 2

Экспериментальные показатели влажности и расчетные градиенты температур при трещинообразовании в процессе сушки образцов различной толщины из спондиловой глины

№ п/п	Показатель	$S = 0,7 \text{ Вт/см}^2$					$S = 1,16 \text{ Вт/см}^2$		
		$h, \text{ см}$							
		1,6	2,0	3,0	6,5	6,5	1,6	1,6	1,6
1	$u_{п.кр}, \%$	16	26	27	28	19	27	27	27,5
2	$u_{п.кр}, \%$	7	16	18	19	6	19	22	20
3	$(\Delta u)_{кр}, \%$	9	10	9	9	13	8	5	7,5
4	$(du/dx)_{п.кр}, \%/см$	33,0	23,3	10,5	5,8	4,65	15	20	21
5	$(\Delta u_{кр}/h), \%/см$	5,64	5,25	3,0	1,43	2,0	5,0	30,1	4,7
6	$(du/dx)_{п.кр}/(\Delta u_{кр}/h) = A$	5,85	4,43	3,5	4,05	2,33	3,0	6,4	4,4
7	$(dt/dx)_{п.м}, \text{ }^\circ\text{C/см}$	59	56	46	31	31	56	54	58
8	$\delta, \text{ }^\circ\text{C}$ (при $u_{п.кр}$)	0,04	0,115	0,10	0,095	0,03	0,095	0,075	0,09
9	$\delta(dt/dx)_{п.м}, \%/см$	2,36	6,44	4,60	2,95	0,93	5,3	4,05	5,2

Откуда соотношение между поверхностным и средним градиентами влажности составит

$$\left(\frac{du}{dx}\right)_п \bigg/ \left(\frac{\Delta u}{h}\right) = 2. \quad (20)$$

Как видно из табл. 2 (6-я строка), только в одном случае из 5-ти при $h = 6,5 \text{ см}$ величина $A = \left(\frac{du}{dx}\right)_{п.кр} \bigg/ \left(\frac{\Delta u_{кр}}{h}\right)$ приближается к 2 (2,33). Во всех остальных случаях A значительно больше 2, что свидетельствует об отсутствии регулярного режима сушки и продолжении начального периода, несмотря на значительный промежуток времени до 60...70 мин от начала облучения тепловым потоком образцов глины.

Учитывая относительную стабильность величины коэффициента температуропроводности глины ($a \approx 0,556 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$), в табл. 2 (7-я строка) приведены расчетные значения максимальных градиентов температуры на облучаемой поверхности образцов различной толщины. Эти данные в сочетании с величинами термоградиентных коэффициентов, взятых по аналогии с нижнекотловской глиной [6] и приведенных в 8-й строке табл. 2, позволяют оценить предельно возможные значения граничных условий перемены потока влаги (13) в начале сушки.

Например, по данным З. А. Смоляковой [10], критическое значение поверхностного градиента влажности $(du/dx)_{п.кр}$ для черемушкинской глины

составляет около 2,2 %/см, что значительно меньше по сравнению с данными 9-й строки табл. 2 для образцов спондиловой глины пластического формирования при $u > 20\%$.

Поэтому интенсивность облучения тепловым потоком при $S = 0,7 \text{ Вт/см}^2$ для черемушкинской глины является совершенно недопустимой и ведет к быстрому образованию поверхностных трещин.

Как указывает А. Ф. Чижский [2], при сушке данных образцов из спондиловой глины образовывались плоскостные трещины (расслоение пластинки) при удалении 3,5...6 % влаги, что происходило через 18...20, 30...35 и 60...70 мин после начала сушки. При этом интенсивность нагревания образцов была в 3...4 раза меньше, чем при стандартном высоком значении теплового потока $S \approx 1,0 \text{ Вт/см}^2$, применяемом при определении чувствительности глины к сушке. Поэтому приведенные в табл. 2 данные (строки 1–6) характеризуют условия тотального разрушения образцов, что, по данным А. В. Лыкова [4], происходит при значительно больших усадочных напряжениях по сравнению с поверхностным трещинообразованием.

Графическое построение зависимостей $\left(\frac{du}{dx}\right)_{\text{п.кр}} = f(h)$ и $\left(\frac{\Delta u}{h}\right)_{\text{п.кр}} = f(h)$,

приведенное на рис. 9, позволяет интерполировать экспериментальные данные (табл. 2) и экстраполировать их до $h = 1 \text{ см}$ (рис. 10). Анализируя поведение кривой $A = f(h)$, приведенной на рис. 10, можно прийти к выводу, что наиболее значительное влияние толщины образца на величину A имеет место при $h \leq 3 \text{ см}$. С дальнейшим увеличением толщины образца величина A стабилизируется, а процесс трещинообразования переходит в область своеобразной автомодельности.

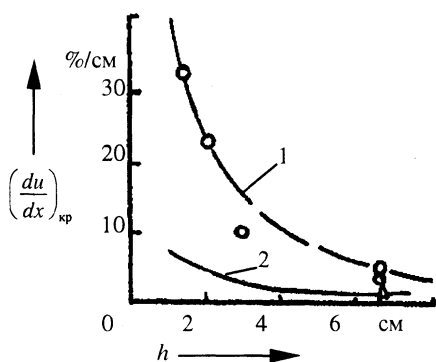


Рис. 9. Зависимость критических градиентов влажности от толщины образцов из спондиловой глины: 1 – поверхностный критический градиент влажности; 2 – средний критический градиент влажности

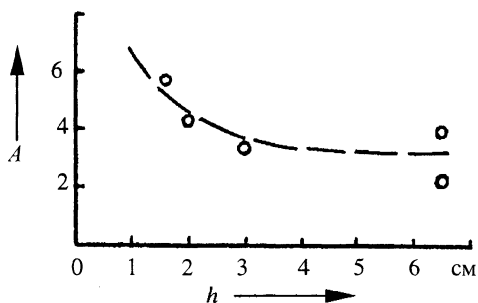


Рис. 10. Зависимость параметра A от толщины пластинки образца

Сравнение критических градиентов влажности, приведенных в 5-й строке табл. 2, с классификацией З. А. Смоляковой (табл. 1) показывает,

что относящаяся к малочувствительным спондиловая глина при толщине образцов до 3 см относится к I классу, при $h = 3$ см находится на границе II и I классов, а при $h = 6,5$ см относится к III...IV классам по чувствительности к сушке, т. е. переходит в разряд средней чувствительности.

Таким образом, с ростом толщины пластины или изделия чувствительность к сушке увеличивается.

Используя графические данные А. Ф. Чижского [2], можно оценить параметры полей влажности высоко- и малочувствительных глин (по оценке А. Ф. Чижского) в образцах толщиной $h = 1,6$ см при облучении интенсивным тепловым потоком в моменты образования поверхностных трещин (табл. 3), значения градиентов температур определены расчетным путем по (8...10).

Таблица 3

Параметры полей температуры и влажности при трещинообразовании в процессе сушки глиняных образцов толщиной $h = 1,6$ см

№ п/п	Показатель	Чувствительность к сушке и время, с		
		Высокая	Малая	
			~50	~100
1	Тепловой поток, Вт/см ²	0,7	1,16	0,7
2	$u_{ц.кр}, \%$	27,0	27,5	27,0
3	$u_{п.кр}, \%$	22,0	20,0	19,0
4	$(\Delta u)_{кр}, \%$	5,0	7,5	8,0
5	$(du/dx)_{п.кр}, \%/см$	20	21	15
6	$((\Delta u)_{кр}/h), \%/см$	3,1	4,7	5,0
7	$(du/dx)_{п.кр}/((\Delta u)_{кр}/h) = A$	6,4	4,4	3,0
8	$(dt/dx)_{п.м}, ^\circ C/см$	59	58	56
9	$\delta, \%/^\circ C$ (при $u_{п.кр}$)	0,075	0,09	0,095
10	$\delta(dt/dx)_{п.м}, \%/см$	4,43	5,2	5,3
11	$\delta(dt/dx)_{п.м}/(du/dx)_{п.кр}$	0,222	0,248	0,348
12	$(dt/dx)_п/(du/dx)_{п.кр}, ^\circ C/\%$	2,96	2,76	3,74
13	$(dt/dx)_{ср}/((\Delta u)_{кр}/h)_{п.кр}, ^\circ C/\%$	9,5	6,2	5,6

Как видно, величины показателя A значительно больше 2, что означает большую удаленность от регулярного режима сушки. Критические значения среднего градиента и перепада влажности между поверхностью и тыльной стороной образца высокочувствительной глины достаточно велики $(\Delta u)_{кр} = 5,0 \%$ и $(\Delta u)_{кр}/h = 3,0 \%/см$ и относятся к I классу чувствительности по классификации З. А. Смоляковой (табл. 1), соответствующему самой высокой трещиностойкости. Необходимо отметить, что при правильном определении чувствительности изделий к сушке рекомендации

З. А. Смоляковой по параметрам сушки (табл. 1), как правило, находят практическое подтверждение.

Если $(\Delta u)_{кр} = 5,0 \%$ отнести к $h = 3,3$ см, что характерно для полнотелого кирпича, получается $(\Delta u)_{кр}/h = 1,32 \%/см$ и глина относится к IV классу по чувствительности к сушке, т. е. достаточно высокочувствительна.

Несовпадение оценок чувствительности глин к сушке, определенных различными лабораторными методами, которые не учитывают разницы в размерах и условиях сушки образцов и изделий, встречаются повсеместно. По-видимому, из-за этого до сих пор нет стандарта или иного общегосударственного нормативно-технического документа для методики лабораторного определения чувствительности глин к сушке.

Соотношение расчетных величин поверхностных градиентов влажности за счет процессов термоградиентного (11-я строка табл. 3) и экспериментальных значений диффузионного (5-я строка) влагопереносов составляют от 0,22 до 0,35, что представляется слишком малой величиной для образования критического перепада влажностей между нагреваемой поверхностью и тыльной стороной образца, особенно для высокочувствительной глины $(\Delta u)_{кр} = 5,0 \%$ при $\tau \approx 50$ с, когда испарение влаги с поверхности еще незначительно. Здесь необходимо учесть инерционность (запаздывание) процессов диффузионного переноса по сравнению с термоградиентными явлениями, что характеризуется критерием Lu и описано выше.

Соотношение средних расчетных градиентов температур и экспериментальных критических влагосодержаний (13-я строка табл. 3) достигает значительных величин, особенно для высокочувствительной глины $(9,5 \text{ } ^\circ\text{C}/\%)$, что при $\delta > 0,1 \text{ } \%/^\circ\text{C}$ дает формальное обоснование термоградиентного движения влаги от нагреваемой поверхности керамического образца в относительно холодные глубинные слои.

С ростом времени интенсивной сушки величины соотношения средних градиентов температур и влажностей уменьшаются, что соответствует росту прогревания образцов и испарению влаги с нагреваемой поверхности.

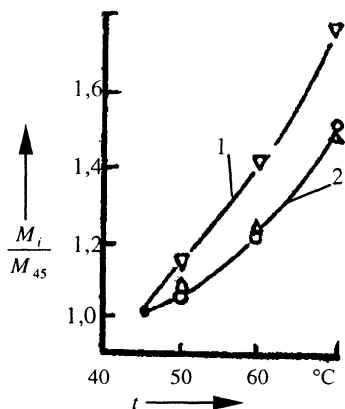


Рис. 11. Влияние повышения температуры спондиловой глины на относительное увеличение предельно допустимой интенсивности сушки: M_i — предельно допустимая интенсивность сушки; M_{45} — то же при $t = 45 \text{ } ^\circ\text{C}$, принятая за начало сравнения; 1 — $h = 3$ см; 2 — 1,6 и 2,0 см

Необходимо также обратить внимание на зависимость процессов трещинообразования от температуры нагревания, например спондиловой глины, что выражается в возможном увеличении интенсивности сушки (рис. 11). Последнее особенно было отмечено А. Ф. Чижским [2], но не нашло реализации в каких-либо методиках расчета режимов сушки.

ВЫВОДЫ

1. С практической и научной точек зрения некорректно характеризовать чувствительность керамических масс пластического формования без конкретизации параметров изделия и процесса сушки.

2. Образование трещин происходит в условиях распределения влажности в поперечном сечении образца, отличающихся от классической квадратичной параболы, характерной для регулярного режима сушки.

3. Применяемый на практике лабораторный метод А. Ф. Чижского прямого термического определения чувствительности образцов формовочных смесей к сушке нуждается в серьезной корректировке.

4. Необходимо продолжить научную разработку прямого лабораторного метода оценки чувствительности керамических изделий к сушке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н о с о в а З. А. Чувствительность глин к сушке. – М.: Гидрометеоиздат, 1946. – 46 с.
2. Ч и ж с к и й А. Ф. Сушка керамических материалов и изделий. – М.: Стройиздат, 1971. – 177 с.
3. З о л о т а р с к и й А. З., Ш е й н м а н Е. Ш. Производство керамического кирпича. – М.: Высшая школа, 1989. – 246 с.
4. Л ы к о в А. В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
5. П е х о в и ч А. И., Ж и д к и х В. М. Расчеты теплового режима твердых тел – М.: Энергия, 1976. – 352 с.
6. Л е б е д е в П. Д. Сушка инфракрасными лучами. – М.: Л.: Госэнергоиздат, 1955. – 232 с.
7. О с и п о в С. Н., К а л и н и ч е н к о Е. С. Оценка предельных режимов сушки изделий строительной керамики в начальном периоде // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1998. – № 6. – С. 50–61.
8. Ж у к о в Д. В. Теоретические основы и практика скоростной сушки кирпича-сырца // Сушка керамических изделий. – М.: Профиздат, 1958. – С. 133–159.
9. С у ш к а керамических стройматериалов пластического формования / И. М. Пиевский, В. В. Гречина, Г. Д. Назаренко, А. И. Степанова. – Киев: Наукова думка, 1985. – 142 с.
10. С м о л я к о в а З. А. Определение оптимального режима сушки кирпича по его структурно-механическим свойствам // Сушка керамических изделий. – М.: Профиздат, 1958. – С. 34–50.

Представлена кафедрой
теплоснабжения и вентиляции

Поступила 4.04.2002